

УДК 539.3

Лавінський Денис Володимирович, Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, м. Харків

Морачковський Олег Костянтинович, Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, м. Харків

РОЗРАХУНКОВЕ ОЦІНЮВАННЯ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ СИСТЕМ ТІЛ ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Статтю присвячено розрахунками електромагнітних полів (ЕМП) і напружено-деформованого стану (НДС) складених конструкцій з урахуванням контактної взаємодії. Велика кількість технічних і технологічних пристроїв працюють під дією ЕМП. У деяких випадках силова дія електромагнітного поля є настільки значимою, що вона може викликати незворотне деформування або руйнування елементів. Магнітно-імпульсна обробка матеріалів (МІОМ) є одним з найбільш яскравих прикладів силового дії ЕМП. Ефективність технологічної операції МІОМ визначається, з одного боку, працездатністю індуктора, а з іншого боку – виникненням в заготовці непружних деформацій. Розрахункові оцінки характеристик індуктора і процесу непружного деформування заготовки можуть бути виконані на основі розподілу характеристик НДС. Дана робота ілюструє реалізацію таких оцінок для одного класу технологічних систем, що складаються з складеного багатовиткового індуктора з допоміжним екраном, який розглядається разом із заготовкою, яка має вм'ятину. Завдання було вирішене за допомогою чисельного методу, заснованого на методі скінчених елементів (МСЕ). Особливості контактної взаємодії були враховані шляхом введення шарів контактних елементів. Розподіл компонентів НДС отримано з урахуванням розподілу ЕМП в квазістаціонарному наближенні для часового максимуму. Визначено раціональні значення деяких конструктивних і експлуатаційних характеристик технологічної системи.

Ключові слова: пружно-пластичне деформування, електромагнітне поле, метод скінчених елементів, контактна взаємодія, магнітно-імпульсна обробка.

Форм. 3. Рис. 4. Літ. 11.

Лавинский Денис Владимирович, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

Морачковский Олег Константинович, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

РАСЧЕТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕЛ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Статья посвящена расчетам электромагнитных полей (ЭМП) и напряженно-деформированного состояния (НДС) составных конструкций с учетом контактного взаимодействия. Большое количество технических и технологических устройств работают под действием ЭМП. В некоторых случаях силовое дей-

ствие электромагнитного поля настолько значимо, что оно может вызвать необратимую деформацию или разрушение элементов. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ) является одним из наиболее ярких примеров силового действия ЭМП. Эффективность технологической операции МИОМ определяется, с одной стороны, работоспособностью индуктора, а с другой стороны – возникновением в заготовке неупругих деформаций. Расчетные оценки характеристик индуктора и процесса неупругого деформирования заготовки могут быть выполнены на основе распределения характеристик НДС. Данная работа иллюстрирует реализацию таких оценок для одного класса технологических систем, состоящих из составного многovitкового индуктора со вспомогательным экраном, который рассматривается вместе с заготовкой, которая имеет вмятину. Задача была решена с помощью численного метода, основанного на методе конечных элементов (МКЭ). Особенности контактного взаимодействия были учтены путем введения слоев контактных элементов. Распределение компонентов НДС получено с учетом распределения ЕМП в квазистационарном приближении для временного максимума. Определены рациональные значения некоторых конструктивных и эксплуатационных характеристик технологической системы.

Ключевые слова: упруго-пластическое деформирование, электромагнитное поле, метод конечных элементов, контактное взаимодействие магнитно-импульсная обработка.

Lavinskii Denis V. National Technical University “KhPI”, Kharkiv

Morachkovskii Oleg K. National Technical University “KhPI”, Kharkiv

DESIGN ASSESSMENT OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMING OF SYSTEMS OF BODIES WITH THE ELECTROMAGNETIC FIELD

The article deals with issues related to the calculation of electromagnetic fields (EM-fields) and the stress-strain state (SSS) of composite structures, taking into account contact deformation. A large number of technical and technological facilities work under the action of EM-fields. In some cases, the force action of the electromagnetic field is so significant that it can cause irreversible deformation or destruction of the elements. Electromagnetic forming (EMF) is one of the most striking examples of the force action of an EM-field. The efficiency of the technological operation of EMF is determined on the one hand by the efficiency of the inductor and on the other hand by the appearance in the workpiece of inelastic deformations. The calculation estimates of the inductor performance and inelastic deformation of the workpiece can be carried out on the basis of the distribution of the characteristics of the SSS. This work illustrates the implementation of such estimates for one class of technological systems consisting of a composite multi-turn inductor with an auxiliary screen, which is considered together with a workpiece that has a dent. The problem was solved by a numerical method, which is based on the finite element method. The peculiarities of contact interaction were taken into account by introducing layers of contact elements. The distribution of the components of the SSS is obtained taking into account the distribution of the EM-field in the quasi-stationary approximation for

the time maximum. The rational values of some design and operational characteristics of the technological system are defined.

Keywords: inelastic deformation, electromagnetic field, the finite element method, contact interaction, electromagnetic forming.

1. Постановка проблеми. Електромагнітне поле (ЕМП) є невід'ємною складовою при експлуатації різноманітних технічних та технологічних систем. У багатьох випадках найбільш визначальним є силовий вплив ЕМП на конструкційні елементи технічних або технологічних систем. Під терміном «силовий вплив ЕМП» маються на увазі випадки, коли наявність ЕМП призводить до інтенсивного деформування елементів системи, яке спроможне викликати незворотні зміни форми та розмірів або руйнування. У таких випадках втрата працездатності або зменшення довговічності елементів технічних або технологічних систем обумовлюється в перше чергу характером процесу деформування. Саме тому створення ефективних розрахункових методів аналізу деформування при дії ЕМП та проведення оцінювання за допомогою таких методів є актуальною науковою та практичною проблемою.

Одним із технологічних процесів, де визначну роль відграє силовий вплив ЕМП, є магнітно-імпульсна обробка матеріалів (МІОМ) – сучасний та перспективний метод обробки, в основі якого покладено властивість електропровідних металевих матеріалів до пластичного деформування та можливість до виникнення вихрових струмів при наявності зовнішнього ЕМП.

При МІОМ джерелом ЕМП є індуктор (соленоїд), який піддається силовому впливу так само як і заготовка. Призначення індуктора (основного елемента технологічної системи) – створювати ЕМП відповідної просторової конфігурації, що потребує незмінності у процесі експлуатації (або змінності у досить малому діапазоні) його форми та розмірів, таким чином, однією з умов працездатності індуктора – це пружне деформування його елементів. За певних умов деформування індуктора може бути достатньо інтенсивним та призводити до його руйнування або виникнення зон пластичних деформацій. В обох випадках ми мусимо робити висновок про втрату працездатності індуктора або про суттєве зменшення його довговічності. Натомість заготовка повинна деформуватись пластично у такій мірі, щоб отримати необхідну просторову конфігурацію. Отже, технологічну операцію МІОМ можна вважати ефективною, якщо індуктор залишається працездатним, а заготовка, при цьому, деформується пластично.

Визначення раціональних конструкційних (розміри та форма індуктора) та експлуатаційних (величина сили струму джерела, частота, взаємне розташування індуктора та заготовки) параметрів за яких технологічна операція МІОМ є ефективною можливо на базі аналізу пружно-пластичного деформування індуктора та заготовки.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Великий клас технологічних операцій МІОМ спрямовано на створення умов для незворотного деформування тонких листових заготовок з метою виправлення можливих дефектів. Для обробки заготовок із неферромагнітних матеріалів запропоновано використовувати складені індуктори із допоміжним екраном [1,2].

Відзначимо, що відома велика кількість досліджень пружно-пластичного деформування заготовки за умов МІОМ [3-5], але при цьому питанню розрахункового аналізу деформування індуктора практично не приділяється ніякої уваги. Сучасний підхід до подібного аналізу передбачає розв'язання, що складається з двох етапів: на першому визначається розподіл компонентів ЕМП, на другому – розподіл компонентів напружено-деформованого стану (НДС). Також слід зазначити, що лише використання чисельних методів розрахунку дозволяє враховувати особливості геометрії елементів технологічної системи, умови їх взаємодії та особливості поведінки матеріалу.

3. Формування мети досліджень. У роботах [6-8] досліджується на основі розрахункового аналізу розподіл компонент ЕМП та пружно-пластичне деформування одно- та багатовиткових індукторів із допоміжними екранами. В останньому випадку визначено, зокрема, що під час імпульсу максимум електромагнітної сили зміщується уздовж поверхні заготовки. У цих роботах розглядалась заготовка без вм'ятини на певній відстані від індуктора. Тепер розглянемо випадок, коли заготовка має вм'ятину, а іншою площиною щільно прилягає до екрану індуктора.

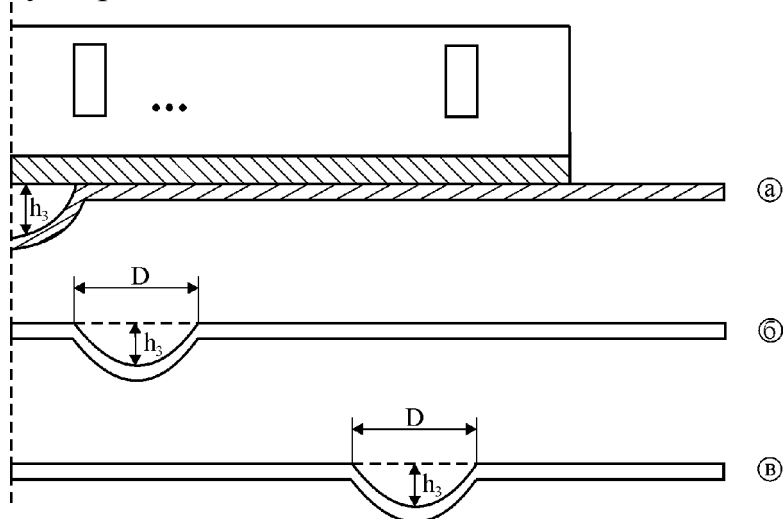


Рис. 1. Розрахункова схема багатовиткового індуктора із допоміжним екраном та заготовки із вм'ятиною

На рис. 1 наведено розрахункову схему багатовиткового індуктора із допоміжним екраном та заготовки із вм'ятиною. Розрахункову схему створено у припущенні вісесиметричного розподілу основних характеристик. Розглядалися три можливі варіанти розташування вм'ятини: безпосередньо в околі центру індуктора (рис. 1 а); у місці, де діють максимальні значення електромагнітної сили згідно до даних [7] (рис. 1 б); у місці, де спостерігається максимальне значення електромагнітної сили у кінці імпульсу (рис. 1 в). Глибина вм'ятини h_3 обиралась такою, щоб заздалегідь забезпечити виникнення пластичних деформацій. Із урахуванням результатів аналізу деформування плоскої заготовки [7], що знаходилась на відстані від індуктора, вона була прийнята 2 мм (така відстань поміж індуктором та заготовкою дозволяє прогнозувати виникнення зон пластичних деформацій). Для даної розрахункової схеми необхідно визначити

розподіл тензорно-векторних характеристик НДС із урахуванням контактної взаємодії при дії ЕМП.

4. Виклад основного матеріалу дослідження. Загальну математичну постановку задачі, що описує розповсюдження векторних компонент ЕМП та тензорних компонент НДС при пружно-пластичному деформуванні за теорією течії за умов дії ЕМП наведено у роботі [9]. Оскільки у нашому випадку індуктор є складеним, а також заготовка прилягає до нього, то при розв'язанні необхідно враховувати умови контактної взаємодії його елементів. Стосовно розповсюдження ЕМП на границі розділу двох тіл повинні виконуватись наступні умови:

$$\begin{aligned} (\vec{E}_m - \vec{E}_{m+1}) \times \vec{n} = 0, \quad (\vec{D}_m - \vec{D}_{m+1}) \cdot \vec{n} = 0; \\ (\vec{H}_m - \vec{H}_{m+1}) \times \vec{n} = 0, \quad (\vec{B}_m - \vec{B}_{m+1}) \cdot \vec{n} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

тут \vec{H}, \vec{E} – вектори напруженості магнітного та електричного полів; \vec{D}, \vec{B} – вектори електричної та магнітної індукції у об'ємі тіл m та $m+1$; \vec{n} – нормаль до контактної границі. У даній моделі ми нехтуємо можливим поверхневим електричним опором, наявністю поверхневих зарядів та струмів.

Умови механічної контактної взаємодії приймемо у вигляді:

$$\vec{n} \cdot \vec{\sigma}^m \cdot \vec{n} = \vec{n} \cdot \vec{\sigma}^{m+1} \cdot \vec{n} \leq 0; \quad \vec{u}^m \cdot \vec{n} + \vec{u}^{m+1} \cdot \vec{n} - \delta \leq 0, \quad (2)$$

де $\vec{\sigma}$ – тензор напружень, \vec{u} – вектор переміщень, δ – зазор (натяг), що може існувати поміж тілами. При цьому дотичні напруження зв'язані із нормальними у рамках закону Кулона:

$$|\vec{n} \cdot \vec{\sigma}^m \cdot \vec{\tau}| = f \vec{n} \cdot \vec{\sigma}^m \cdot \vec{n}, \quad (3)$$

тут $\vec{\tau}$ – одиничний вектор спільної дотичної, f – коефіцієнт тертя.

Геометричні параметри елементів розрахункової схеми (рис.1) є наступними: кількість витків – 11, радіус індуктора – 70 мм, радіус заготовки – 100 мм, товщина індуктора – 22 мм, товщина екрану – 1 мм, товщина заготовки – 1 мм, ширина витка струмопроводу – 3 мм, висота витка струмопроводу – 10 мм, зазор поміж витків – 2 мм. Глибина вм'ятини h_3 обиралась такою, щоб заздалегідь забезпечити виникнення пластичних деформацій. Із урахуванням результатів попереднього аналізу вона була прийнята 2 мм (така відстань поміж індуктором та заготовкою дозволяє прогнозувати виникнення зон пластичних деформацій). Радіальний розмір вм'ятини D приймався дорівнюючим 10 мм, поміж екраном та бандажем враховувався натяг 0.03 мм. У таблиці 1 наведені фізико-механічні параметри елементів системи (тут μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу, γ – електрична провідність, E – модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона, σ_T – межа текучості матеріалу, σ_B^+ , σ_B^- – межа міцності матеріалу на розтяг та стиск). Розміри оточуючого середовища, а також граничні умови обирались відповідно до рекомендацій робіт [5,6]. Джерелом ЕМП розглядався струм, що був рівномірно розподіленим по перерізу витків струмопроводу, у часі густина струму змінювалась за законом $j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi f t} \cdot \sin(2\pi f t)$, де амплітуда сили струму $I_m = 40$ кА, частота $f = 2$ кГц, відносний коефіцієнт затухання $\delta = 0.3$.

Таблиця 1. Фізико-механічні параметри елементів системи

	струмопровід, мідь	допоміжний екран, сталь	заготовка, сталь	ізоляція, капролон	повітря
μ_r	1	1	1	1	1
$\gamma, (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	7×10^7	0.2×10^7	0.2×10^7	0	0
$E, \text{ГПа}$	180	215	200	2.5	—
ν	0.33	0.27	0.29	0.3	—
$\sigma_T, \text{МПа}$	200	270	220	—	—
$\sigma_B^+, \text{МПа}$	—	—	—	70	—
$\sigma_B^-, \text{МПа}$	—	—	—	90	—

Розв'язання проводилось за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ). Скінчено-елементна модель була створена із застосуванням чотирьох-вузлового скінченого елемента із білінійною апроксимацією переміщень та окружної компоненти векторного магнітного потенціалу [10,11]. Умови контактної взаємодії моделювались шляхом того, що поміж екраном та ізоляцією, поміж струмопроводом та ізоляцією, а також поміж екраном та заготовкою вводились шари контактних скінчених елементів (КСЕ), які моделювали відповідні умови взаємодії.

На першому етапі розв'язання були одержані просторово-часові розподіли компонент ЕМП у індукторі та заготівці. Стосовно індуктора результати є ідентичними до тих, які було одержано раніше [7]. Стосовно заготовки, то тут спостерігаються відмінності у розподілі електромагнітної сили уздовж її поверхні. На рис.2 наведено розподіл електромагнітної сили на поверхні заготовки в околі вм'ятини (результати наведені для другого варіанту розрахункової схеми – рис. 1 б).

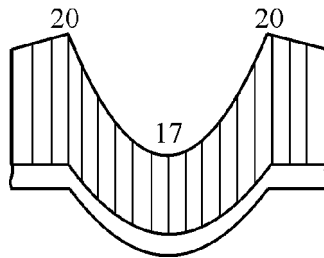


Рис. 2. Розподіл електромагнітної сили в околі вм'ятини

Подальший аналіз деформування проводився у квазістаціонарній постановці для варіантів розподілу компонент ЕМП, які відповідають трьом моментам часу: 0.001с (максимальні значення компонент ЕМП), 0.005 с та 0.017 с (розподіл ЕМП, який є близьким до квазістаціонарного). Віднайдені розподіли тензорних та векторних характеристик НДС дозволяють розрахунковим шляхом робити оцінки стосовно працездатності та довговічності індуктора, а також оцінки впливу зовнішнього НДС на пружно-пластичне деформування заготовки.

Розглянемо деякі результати стосовно дослідження контактного деформування складеного індуктора. Корисну інформацію в рамках методу, який використовується, надає розгляд розподілів контактної сили уздовж границь

розділу поміж складових частин конструкції. Так, якщо на частині границі контакту тиск дорівнює нулю – це означає, що у даній області контактна взаємодія порушується. З огляду на це, розпочнемо аналіз результатів саме з розгляду розподілу контактного тиску уздовж границі розділу поміж екраном та бандажем.

На рис. 3 наведено просторові розподіли контактного тиску уздовж границі розділу поміж екраном та бандажем при різних значеннях величини натягу. В усіх випадках можна стверджувати про неоднорідність у розподілі контактного тиску – має місце яскраво виражений максимум у зоні, де екран прикріплюється до бандажу. На віддаленні від зони кріплення величина контактного тиску значно (в околі центру індуктора більш ніж удвічі) зменшується. Факт зменшення величини контактного тиску може бути пояснений тим, що поміж екраном та струмопроводом є наявними ефекти відштовхування (взаємодіючі струми протікають у різних напрямках), а максимальні значення електромагнітних сил спостерігаються у зоні, що безпосередньо знаходиться в околі центру індуктора.

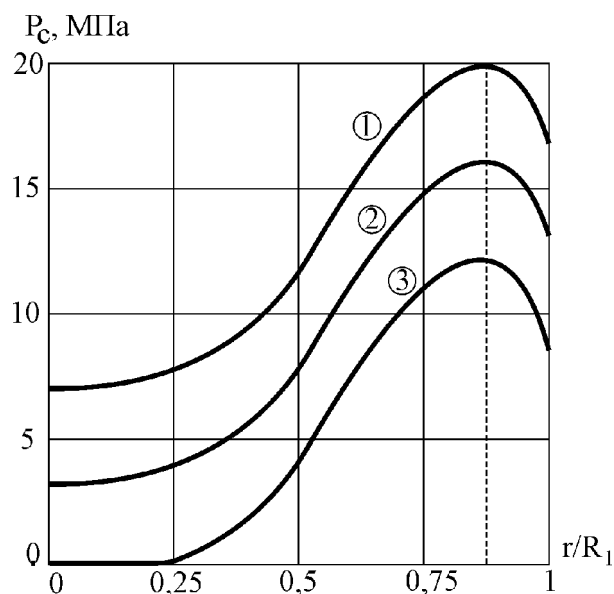


Рис. 3. Розподіл контактного тиску поміж допоміжним екраном та бандажем при різних значеннях величини натягу: 1 – 0.3 мм; 2 – 0.2 мм; 3 – 0.1 мм

Як видно з рисунку, при найменшому значенні величини натягу (0.1 мм) в околі центру індуктора (приблизно в області 25% величини радіусу допоміжного екрану) спостерігаються нульові значення контактного тиску – це означає, що у цій зоні екран відходить від бандажу. Тобто, порушується цілісність індуктора, що із загальних міркувань є неприпустимим. Відповідно, можна очікувати, що при збільшенні величини сили струму у індукторі (а це традиційний підхід, який використовується для збільшення силового впливу на заготовку) збільшуватимуться і розміри області, у межах якої екран може відходити від бандажу.

Далі розглянемо вплив, який здійснює на пружно-пластичне деформування заготовки розмір дефекту – вм'ятини. Було проведено серію розрахунків, у яких варіювалась глибина вм'ятини з метою встановлення меж застосування подібного індуктора за розглянутих експлуатаційних параметрах. На рис. 4 наведена залежність максимальної інтенсивності напружень у заготовці від гли-

бини вм'ятини при фіксованому радіальному розмірі (для першого варіанту розташування вм'ятини). З наведеного графіку зрозуміло, що при глибині вм'ятини до 15 мм максимальна інтенсивність напружень перевищує межу текучості, що свідчить про виникнення у цій зоні пластичних деформацій. Якщо ж глибина вм'ятини перевищує 15 мм, то інтенсивність напружень у заготовці в околі вм'ятини стає меншою за межу текучості, тобто пластичні деформації не будуть виникати і мета технологічної операції не буде досягнута.

Інтерес також представляють ситуації, коли розташування дефекту не співпадає із «максимумом ЕМП». Були проведені відповідні розрахунки, у яких варіювалась не лише глибина вм'ятини, а й її місце розташування, а також якісний і кількісний розподіл компонент ЕМП. Виявилось, що навіть коли вм'ятини розташована на найбільшій відстані від зони, де спостерігається «максимум ЕМП», все одно у певному діапазоні глибини в її околі максимальна інтенсивність напружень перевищує межу текучості матеріалу, тобто виникають пластичні деформації.

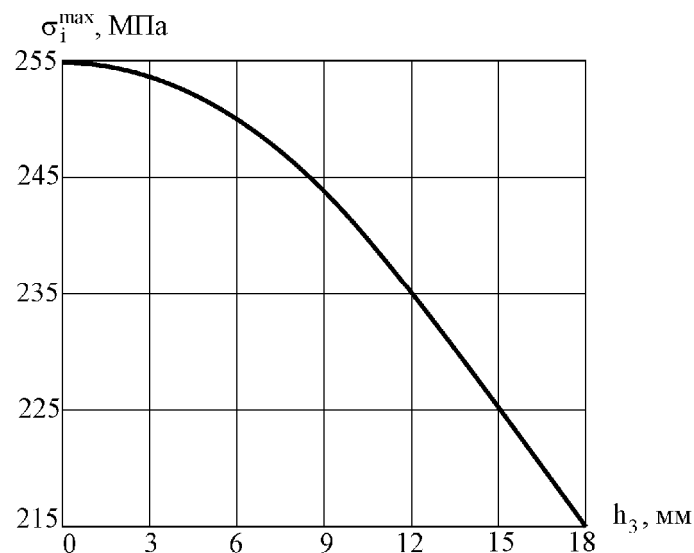


Рис. 4. Залежність максимальної інтенсивності напружень у заготовці від глибини вм'ятини

Так, виявилось, що у випадку, коли вм'ятини розташована безпосередньо під зоною «максимуму ЕМП», то максимальна глибина, за якої будуть виникати пластичні деформації складає: 15 мм (1-й варіант розташування вм'ятини, момент часу 0,001 с); 14,9 мм (2-й варіант, 0,005 с); 13,3 мм (3-й варіант, 0,017 с). Для випадків, коли вм'ятини розташована на найбільшій відстані від «максимуму ЕМП» результати наступні: 12,9 мм (3-й варіант, 0,001 с); 12,7 (2-й варіант, 0,005 с); 12,5 (1-й варіант, 0,017 с).

5. Висновки. У розглянуто сумісне деформування багатовиткового індуктору із допоміжним екраном та заготовки із дефектом – вм'ятиною. Віднайдені просторово-часові розподіли основних компонентів електромагнітного поля та напружено-деформованого стану. На базі цього проведено розрахункове оцінювання пружно-пластичного деформування індуктора та заготовки із урахуванням контактних явищ, що дозволило визначити раціональні значення деяких конструкційних та експлуатаційних параметрів.

Можна стверджувати, що багатовиткові індуктори із допоміжними екранами, конструкційні та експлуатаційні характеристики яких ідентичні розглянутим, можна використовувати для пластичного деформування тонких заготовок із вм'ятинами, які можуть розташовуватись будь-де в межах робочої області. Якщо вм'ятина розташована безпосередньо у зоні виникнення максимальних за величиною значень компонент ЕМП, то за допомогою індукторів даного типу є можливість викликати пластичні деформації в околі вм'ятини при її глибині до 15 мм. Якщо не має змоги точно розташовувати вм'ятину у зоні дії «максимуму ЕМП», то у цьому випадку є можливість викликати пластичні деформації в околі вм'ятини при її глибині до 12.5 мм включно.

Список використаних джерел

1. Batygin Y.V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Y.V. Batygin, S.F. Golovashchenko, A.V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technologies. – 2014. – № 214 (2). – 390-401 P.
2. Batygin Y.V. Pulsed Electromagnetic Attraction of Sheet Metals – Fundamentals and Perspective Applications / Y.V. Batygin, S.F. Golovashchenko, A.V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technologies. – 2013. № 213 (1). – 444-452 P.
3. Svendsen B. Continuum thermodynamic modeling and simulation of electromagnetic metal forming / B. Svendsen, T. Chanda // Technische Mechanik. – 2003. – № 23. – 103-112 P.
4. Cui X. Numerical simulation of electromagnetic sheet bulging based on FEM / X. Cui, J. Mo, S. Xiao, X. Du, J. Zhao // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – № 57. – 127-134 P.
5. Deng J. Numerical simulation of magnetic flux and force in electromagnetic forming with attractive force / J. Deng, C. Li, Z. Zhao, F. Tu, H. Yu // Journal of Materials Processing Technologies. – 2007. – № 184. – 190-194 P.
6. Лавінський Д. В. Пружно-пластичне деформування складених конструкцій при дії електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Вібрації в техніці та технологіях. – 2016. – № 3 (83). – С. 103-108.
7. Лавінський Д. В. Деформування складених індукторів із допоміжним екраном при магнітно-імпульсній обробці / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Вібрації в техніці та технологіях. – 2017. – № 4 (87). – С. 29-33.
8. Lavinsky D. V. The nonlinear deformation of the compound structures under electromagnetic forming // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. – 2017. – №. 39. – С. 95-98.
9. Altenbach H. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields / H. Altenbach, O. Morachkovsky, K. Naumenko, D. Lavinsky // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2016. – № 28 (5). – 1421-1433 P.
10. Cazzani A. Four-noded mixed finite elements, using unsymmetric stresses, for linear analysis of membranes / A. Cazzani, S.N. Atluri // Computational Mechanics. – 1993. – № 11(4). – 229-251 P.
11. Cazzani A. A four-node hybrid assumed strain finite element for laminated composite plates / A. Cazzani, E. Garusi, A. Tralli, S.N. Atluri // CMC Comput. Mater. Contin. – 2005. – № 2(1). – 23-38 P.

Список використаних джерел в транслітерації

1. Batygin, Y.V., Golovashchenko, S.F., & Gnatov, A.V. (2014). Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technologies*, 214 (2), 390401.
2. Batygin, Y.V., Golovashchenko, S.F., & Gnatov, A.V. (2013). Pulsed Electromagnetic Attraction of Sheet Metals – Fundamentals and Perspective Applications. *Journal of Materials Processing Technologies*, 213 (1), 444-452.
3. Svendsen, B., Chanda, T. (2003). Continuum thermodynamic modeling and simulation of electromagnetic metal forming. *Technische Mechanik*, 23, 103–112.
4. Cui, X., Mo, J., Xiao, S., Du, X., & Zhao, J. (2011). Numerical simulation of electromagnetic sheet bulging based on FEM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57, 127–134.
5. Deng, J., Li, C., Zhao, Z., Tu, F., & Yu, H. (2007). Numerical simulation of magnetic flux and force in electromagnetic forming with attractive force. *Journal of Materials Processing Technologies*, 184, 190–194.
6. Lavinskii, D.V., & Morachkovskiy, O.K. (2016). Pruzhno-plastychne deformuvannya skladennykh konstruktsiy pry diyi elektromahnitnoho polya [Inelastic deformation of composed structures under the action of electromagnetic field]. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh – Vibration in engineering and technology*, 3 (83), 103-108 [in Ukrainian].
7. Lavinskii, D.V., & Morachkovskiy, O.K. (2017). Deformuvannya skladennykh inductoriv iz dopomizhnym ekranom pry mahnitno-impul'sniy obrobci [Deformation of composed coils with assistant screen under the electromagnetic forming]. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh – Vibration in engineering and technology*, 4 (87), 29-33 [in Ukrainian].
8. Lavinsky, D. V. (2017). The nonlinear deformation of the compound structures under electromagnetic forming . *Visnyk Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Ser.: Dynamika ta micnist' mashin – Bulletin of the National Technical University "KhPI" : coll. works. Ser.: Dynamics and Strength of Machines*, 39, 95-98.
9. Altenbach, H., Morachkovsky, O., Naumenko, K., & Lavinsky, D. (2016). Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2016, 28 (5), 1421–1433.
10. Cazzani, A., & Atluri, S.N. (1993). Four noded mixed finite elements, using unsymmetric stresses, for linear analysis of membranes. *Computational Mechanics*, 11 (4), 229–251.
11. Cazzani, A., Garusi, E., Tralli, A., & Atluri, S.N. (2005). A four-node hybrid assumed-strain finite element for laminated composite plates. *CMC Comput. Mater. Contin.*, 2 (1), 23–38.

Стаття надійшла до редакції 16.05.2018